
5 **Verfahren zur Bestimmung der Vorspannkraft von Verbindungsbauteilen durch
Ultraschallanregung**

10 Technisches Gebiet

Mechanische Verbindungsbauteile wie zum Beispiel Schrauben oder Bolzen werden mittels Ultraschall-Messverfahren auf ihre Vorspannkraft hin überprüft. Dazu wird die Signallaufzeit von Ultraschallwellen, die mit einer oder mehreren separaten, häufig vordefinierten Arbeitsfrequenzen in das jeweilige Verbindungsbauteil eingekoppelt werden, vermessen. Im Zuge der fortschreitenden Materialwissenschaften sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von Verbund- und gradierten Werkstoffe sowie Speziallegierungen eingeführt worden, aus denen Verbindungsbauteile wie Bolzen oder Schrauben gefertigt werden können, deren Materialeigenschaften höhere Anforderungen an ein Messverfahren zur Bestimmung der Vorspannkraft stellen.

Stand der Technik

Bei bisher bekannten Ultraschall-Messverfahren werden zur Bestimmung von beispielsweise der Schraubenvorspannkraft einer als Verbindungsbauteil eingesetzten Schraube die Signallaufzeit von Ultraschallwellen mit einer oder mehreren, separaten häufig vordefinierten Arbeitsfrequenzen vermessen.

Eine Anwendung der bekannten Ultraschall-Messverfahren auf die in den letzten Jahren eingeführten Verbund- und gradierten Werkstoffe sowie Speziallegierungen, die aus dem Fortschritt in den Materialwissenschaften herrühren, versagt häufig, weil unter erhöhter Vorspannkraft oder bei Verbiegung längerer Schrauben im gewünschten Ziellastbereich sich das vom Material des Verbindungselementes durchgelassene Ultraschallfrequenzspektrum stark verändert und oft ganze Frequenzbänder ausfallen und für die Vermessung nicht mehr zur Verfügung stehen. Dies führt dazu, dass diese Messverfahren,

die auf fest vordefinierten Frequenzen und/oder auf engen Frequenzbereichen beruhen, beim Wegfall einer oder mehrerer Frequenzbereiche unbrauchbare Ergebnisse liefern.

Bei bekannten Verfahren der Spannkraftmessung mittels Ultraschall-Echoverfahren werden zum Beispiel Mehrfrequenzverfahren mit zwei Frequenzen eingesetzt. Diese haben den Nachteil, dass, bedingt durch die Eigenschaften des Materials einer Schraube oder eines Bolzens, im Bereich der Schalllaufstrecke an Korngrenzen oder anderen Materialstrukturen Reflexionen auftreten und zu destruktiven Interferenzen für die eingesetzten Arbeitsfrequenzen führen können. Bei der Veränderung von Schrauben oder Bolzen durch die auf diese jeweils wirkende Spannkraft können sich zudem die Materialeigenschaften so verändern, dass die ohne Vorliegen einer Spannkraft noch beobachtbaren Signale bei den gewählten Arbeitsfrequenzen bei einer bereits anliegenden, sowie im Falle einer variablen Spannkraft nicht oder nur noch unzureichend beobachtet werden können. Damit verschlechtert sich bei Erhöhung der Spannkraft im Verbindungsbauteil die Auflösung bei der Laufzeitmessung oder die Messung der Laufzeit des eingekoppelten Ultraschallechos wird sogar unmöglich.

Bei bekannten Verfahren, die auf der Anregung mit kurzen Pulsen oder Flanken beruhen (stufenförmige Signale), wird wegen der bei kurzen Signalen auftretenden, entsprechend großen Bandbreite ein breitbandiges Signal eingesetzt. Dieses kann aber wegen der Spannungsbegrenzung im Hinblick auf die Signalamplituden oder die Signalleistung bei der Erzeugung oder wegen Einschränkungen bei der Detektion kleiner Signale nach der Anregung auf der gleichen Leitung nur unvorteilhaft genutzt werden. Der Grund dafür liegt darin, dass mit einer Erhöhung der Sendeleistung durch dafür erforderliche Verstärkung auch eine für die Detektion mit optimalem Signal-zu-Rausch-Verhältnis abträgliche Erhöhung des Rauschpegels verbunden ist. Ferner können bei höheren Signalspannungen nur weniger vorteilhafte Schalter oder Eingangsverstärker genutzt werden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass für Verstärker zur Erhöhung der Sendeleistung relativ hohe Kosten aufgewendet werden müssen, um mit solchen Komponenten hohe Spannungen beziehungsweise hohe Leistungen bereitzustellen.

Aus DE 42 24 035 A1 sowie DE 42 32 254 A1 ist ein Ultraschall-Prüfverfahren bekannt. Gemäß dieses Verfahrens wird zur Ansteuerung eines in einer Übertragungsstrecke angeordneten Ultraschallwandlers ein frequenzmoduliertes Chirp-Signal $x(t)$ vorgesehen, dessen momentane Frequenz f nicht linear mit der Zeit t moduliert wird. Der zeitliche Verlauf $f(t)$ der momentanen Frequenz f des frequenzmodulierten Chirp-Signals $x(t)$ an die

Übertragungsfunktion $H(f)$ ist an die vorgegebene Übertragungsstrecke angepasst. Zeitliche Änderungen der momentanen Frequenz f des frequenzmodulierten Chirp-Signals $x(t)$ sind derart mit dem zu dieser Frequenz f gehörenden Wert der Übertragungsfunktion $H(f)$ der Übertragungsstrecke korreliert, dass bei Frequenzen f mit niedrigem zugehörigen Wert der Übertragungsfunktion $H(f)$ die Geschwindigkeit der Frequenzänderung kleiner ist als bei Frequenzen f mit hohem zugehörigen Wert der Übertragungsfunktion $H(f)$. Zur Ansteuerung des Ultraschallwandlers ist gemäß den Lösungen aus DE 42 24 035 A1 und DE 42 32 254 A1 ein rechteckförmiges Chirp-Signal $x'(t)$ vorgesehen. Es wird ein Signalgenerator zur Ansteuerung des Ultraschallwandlers mit einem frequenzmodulierten Chirp-Signal $x(t)$ eingesetzt, dessen momentane Frequenz f nicht linear von der Zeit abhängt und ein Pulscompressionsfilter, der zum Umwandeln des von diesem oder einem anderen Ultraschallwandler empfangenen Chirp-Signals $y(t)$ in einen kurzen Empfangsimpuls $z(t)$ dient.

15 Darstellung der Erfindung

Um die Vorteile einer gepulsten Anregung, d.h. die Breitbandigkeit, als auch die Amplitude (Spannung) bei der elektrischen Anregung des Verbindungsbauteils in vorteilhafter Weise klein halten zu können, wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, das Verbindungsbauteil, wie zum Beispiel eine Schraube oder einen Bolzen, breitbandig zeitlich ausgedehnt, jedoch in der Länge zur Beobachtung von Echos anpassbar anzuregen. Es ist zwar bekannt, eine gepulste Anregung breitbandig vorzunehmen, jedoch sind die Vorteile bisher nicht erkannt, da mit kurzen Pulsen oder Stufensignalen die Ausgangsleistung (d.h. Leistung des Ausgangsverstärkers) nicht optimal ausnutzbar ist, da die Breitbandigkeit über extrem kurze Signalabschnitte (kurze Pulse, kleine Stufen) erzeugt wird.

Mittels eines digital programmierbaren Arbiträrgenerators (arbitrary function generator), der hinsichtlich der Signalform manipulierbar ist, wird eine zeitlich begrenzte gepulste Anregung mit geeignet vorgegebener Pulsbreite mit einem determinierten, zeitlich veränderlichen Verlauf gewählt (wie z.B. breitbandiges Rauschen). Es kann z.B. ein breitbandiges Rauschen gewählt werden, das so strukturiert ist, dass unter Berücksichtigung der nutzbaren Bandbreite von eingesetzten Transducern alle Frequenzen mit etwa gleicher Amplitude enthalten sind. An dieser Stelle sei auf die Publikation „An Ultrasonic Pseudorandom Signal-Correlation System, Charles M. Elias in IEEE Transactions on Sonics and Ultraconics, Vol. SU-27, No. 1, January 1980, Seiten 1 bis 6,

- verwiesen. Dies bedeutet, dass mit dem Ultraschallanregungspuls ein maximal anregbares Ultraschallfrequenzspektrum angeregt wird, in welchem so viele Frequenzen, wie durch die Pulsbreite und obere gewählte Grenzfrequenz möglich, angeregt werden. Dies kann auch durch anders strukturierte Pulse als das oben genannte breitbandige Rauschen erfolgen, wie z.B. aus „Radar Design Principles“, signal processing and the environment, 5 Fred E. Nathanson, J. Patrick Reilly und Marvin N. Cohen, McGraw-Hill, Inc., New York, St. Louis, San Francisco, 1991, 1969, ISBN 0-07-046052-3, Kapitel 8, Seite 351 ff. bekannt. Aufgrund des Umstandes, dass ein zeitlich ausgedehntes Signal eingesetzt wird, ist in vorteilhafter Weise ein relativ hoher Leistungseintrag bei relativ geringer
- 10 Signalamplitude in das Verbindungsbauteil möglich. Bei Anwendung des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens werden üblicherweise Spannungen zwischen 2 V und 5 V in der Praxis eingesetzt, während bei bekannten Verfahren die Spannungswerte typischerweise bei 100 V liegen und eine 400-fach höhere Leistung benötigt wird. Durch die Breitbandigkeit ist außerdem das erfindungsgemäß
- 15 vorgeschlagene Verfahren stabil gegenüber sich durch die Vorspannung des Verbindungsbauteils ergebender Änderungen seiner Materialeigenschaften im Hinblick auf eine Dämpfung oder den kompletten Ausfall einzelner Frequenzbereiche, da das Ultraschallfrequenzspektrum so viele Frequenzbereiche wie möglich anregt.
- 20 Die Ultraschallsignale sind bei dem oben genannten Beispiel so gewählt, dass die Amplituden beziehungsweise die Leistung in allen Frequenzbereichen integriert mit über die Pulsbreite möglichst ausgeglichen verläuft. Dabei variiert im Falle des breitbandigen Rauschens die Phasenlage statistisch oder verändert sich bei anderen Signalen in vorgegebener stetiger Weise. Durch die vorgegebene oder gewählte Bandbreite, von der
- 25 die Anstiegs- und die Abfallzeit des Pulses begrenzt ist, wird so z.B. ein breitbandiger Puls mit rauschendem Signal bei zeitlich annähernd rechteckförmiger (bezogen auf den Zeitbereich) gepulster Leistungsverteilung erzeugt.
- Da die in das Verbindungsbauteil, wie zum Beispiel eine Schraube oder einen Bolzen,
- 30 eingekoppelten Signale mit festgelegter, jedoch über die Frequenzbereiche variierender Phasenlage erzeugt werden, stehen die Phaseninformationen zusammen mit den Amplitudeninformationen in Abhängigkeit von der Frequenz zur Verfügung, so dass diese bei der Auswertung der detektierten Echosignale genutzt werden können. An dieser Stelle sei auf die Literaturstelle „Radar Design Principles“, „signal processing and the
- 35 environment, Fred E. Nathanson, J. Patrick Reilly und Marvin N. Cohen, McGraw-Hill,

Inc., New York, St. Louis, San Francisco, 1991, 1969, ISBN 0-07-046052-3, dort Kapitel 12, Seiten 533 bis 582 verwiesen.

5 Echosignale werden bei der Detektion zur Pulskompression genutzt. Anders als bei analogen Verfahren erfolgt die Pulskompression hier nach der Digitalisierung der Verfahren mittels einer geeigneten Software rechnerbasiert.

10 Der Vorteil der Anregung beispielsweise mit einem Pseudo-Random Noise-Signal oder mit Signalen mit statistischer Phasenlage bei der Messung der Vorspannkraft in Verbindungsbauteilen wie z.B. Schrauben liegt darin, dass die Schrauben durch fertigungsbedingte Streuungen bei der Herstellung und unvorhersehbare Veränderungen des Frequenz- und des Phasengangs beim Anziehvorgang systematische, aber nicht vorhersehbare Laufzeitänderungen und Reflexe der Ultraschallsignale bewirken, die zu unvorhersehbaren schädlichen Konstruktions- und Rekonstruktionsinterferenzen führen, 15 die die Messung stören. Bei unvorhersehbaren Störungen wird ein statistisch verteiltes Eingangssignal (Pseudo-Random-Noise) oder ein pseudo-statistisches Eingangssignal zur Minimierung solcher sich ergebenden Interferenzen eingesetzt. Der dadurch erzielte Vorteil bei der Messung und für die Sicherheit ist insbesondere bei sicherheitsrelevanten kritischen Schraubenverbindungen wie z.B. in der Luftfahrt signifikant.

20

Daneben eignet sich in vorteilhafter Weise als Anregungssignal der lineare Chirp, da viele der in Verbindungsbauteilen wie etwa Schrauben beobachtenden Störungen und Interferenzen bei diesem Verfahren noch zu vorteilhaften Ergebnissen führen.

25 Zeichnung

Anhand der Zeichnung wird das erfindungsgemäß vorgeschlagene Verfahren detaillierter beschrieben.

30 Es zeigt:

Figur 1 eine Ausführungsvariante eines Ultraschallmesssystems mit einem Zirkulator, Schalter oder ein Reflektometer oder eine elektrische Verbindung.

35

Ausführungsvarianten

Der Darstellung gemäß Figur 1 ist in schematischer Weise eine Ausführungsvariante eines Ultraschallmesssystems für Verbindungsbauteile, wie zum Beispiel Schrauben zu entnehmen. Ein mit Bezugszeichen Z bezeichnetes Bauteil kann entweder als ein Zirkulator, als ein Schalter, als ein Reflektometer oder als eine elektrische Verbindung dargestellt werden.

Unter „Pseudo-Random Noise“ (prn) wird nachfolgend ein Signal verstanden, welches ein oder mehrere Tests für statistische Verteilung erfüllt. Obwohl dem Signal ein definiertes Muster zu fehlen scheint, enthält ein Pseudo-Random Noise-Signal eine Frequenz von Pulsen, die sich wiederholen, jedoch erst nach einer längeren Zeit oder einer längeren Pulsfolge.

Das als Schraube ausgebildete Verbindungsbauteil 1 gemäß der Darstellung in Figur 1 umfasst einen Schraubenkopf 2 sowie einen Schaft 3. Unterhalb des Schaftes 3 verläuft ein Gewindeteil 4. Auf dem Schraubenkopf 2 befindet sich ein Transducer 5 für einen Ultraschallpuls 7, der als Chirp-Puls ausgebildet ist. Bei Chirp-Pulsen handelt es sich um Pulse, wie zum Beispiel lineare Chirp-Pulse, die Frequenzen aufweisen, deren Schwerpunkt mit dem Abstand vom Pulsbeginn abhängig von der Frequenz linear ansteigt oder abfällt. Mit dem Chirpverfahren lässt sich bei der Detektion eine zeitliche Kompression erreichen, wobei eine für den Transducer minimale Pulsbreite erreicht wird. Ferner ist eine Deltapulserzeugung aus frequenzbegrenzten Signalspektren denkbar, durch Überlagerung vieler sinus- oder cosinusförmiger Partialwellen um die Phase 0° beziehungsweise 180° (π) im Falle der cosinus-Funktion. Im allgemeinsten Falle lassen sich die Signalkomponenten durch eine e-Funktion der Form $e^{(j\omega t)}$ darstellen. Je mehr Frequenzen bei der Anregung beteiligt sind, desto stärker ist das nach der Kompression zu beobachtende Maximum beziehungsweise die Ausprägung des Maximums. Die Kompression erfolgt nach der Digitalisierung des empfangenen Signals über Rechner und Rechnerprogramme. Dabei wird das empfangene Signal zuerst fourier-transformiert. Dann werden die spektralen Komponenten in der Phase so verschoben, dass sich bei einer Darstellung über cosinus-Funktionen für einen mit Bezug zum Anregungszeitpunkt festgelegten Zeitpunkt bei Abwesenheit der Vorspannkraft die Phasenlage 0 ergibt. Dadurch entsteht nach der Rücktransformation an diesem Zeitpunkt ein komprimierter Puls mit markanter maximaler Amplitude. Die Position des vom Betrag her maximalen Signals wird durch Anpassung einer Halbwelle in der Umgebung dieses Maximums bestimmt. Die Verschiebung der spektralen Komponenten und die Form der Anpassfunktion werden für

das jeweilige Verbindungsbauteil 1 für alle Vorspannkraften gleich gewählt. Die Laufzeitdifferenzen, die zur Bestimmung der Vorspannkraft benutzt werden, ergeben sich durch Differenzbildung der Messung des Ergebnisses aus der Messung ohne Vorspannkraft. Der Zusammenhang zwischen Vorspannkraft und den beobachteten Laufzeitdifferenzen für das jeweilige Verbindungsbauteil 1 oder ein Los desselben wird empirisch mit Zugmaschinen, welche die genaue Aufprägung einer Spannkraft erlauben, festgestellt. Mit dem so festgestellten Zusammenhang wird die jeweilige Einzelmessung ausgewertet und die Spannkraft angezeigt.

Der Transducer 5 gemäß Figur 1 umfasst eine Elektrode 5.1, an welcher die Signalleitung angeschlossen ist sowie eine darunter liegende Schutzschicht 5.2. Unterhalb der Schutzschicht 5.2 und der Oberseite des Schraubenkopfes 2 befindet sich ein piezoelektrischer Dünnschicht 5.3. Durch Bezugszeichen 6 ist der Laufweg des an den Transducer 5 eingekoppelten Ultraschallpulses 7 durch das schraubenförmig ausgebildete Verbindungselement 1 zu entnehmen. Der Transducer 5 des Ultraschallpulses 7 stellt gleichzeitig die Auskopplungsstelle eines Ultraschallpuls-Echos 8 dar. Die Zeit, die zwischen der Einkopplung eines Ultraschallpulses 7 an den Transducer 5 in das schraubenförmig ausgebildete Verbindungsbauteil 1 und der Auskopplung des Ultraschallpuls-Echos 8, ebenfalls an dem Transducer 5, vergeht, ist durch t angedeutet.

An die Signalübertragungsleitung zwischen dem als Schraube ausgebildeten Verbindungsbauteil 1 ist das mit Z bezeichnete Bauteil angeschlossen, bei dem es sich um einen Zirkulator, einen Schalter, ein Reflektometer oder eine elektrische Verbindung handeln kann. An Z ist ein Verstärker V angeschlossen, dem ein Transientenrekorder TR nachgeschaltet ist. Dieser ist mit einem Rechner PC verbunden, der seinerseits den Arbiträrgenerator AFG ansteuert. Der Arbiträrgenerator AFG seinerseits ist mit dem Z verbunden. Ein Repetitionsratengenerator RG steuert den Transientenrekorder TR und den Arbiträrgenerator AFG. Ein Taktgeber TG steuert den Arbiträrgenerator AFG, den Transientenrekorder TR und den Repetitionsratengenerator RG. Der PC ist mit Datenleitungen mit dem Arbiträrgenerator AFG und dem Transientenrekorder TR verbunden.

Der in Figur 1 dargestellte Ultraschallpuls 7 wird mit Hilfe des Arbiträrgenerators ("arbitrary function generator") AFG erzeugt. Der Rechner PC übernimmt die Einstellungen sowie die Datenerfassung und deren Verarbeitung. Der Ultraschallpuls 7 stellt eine zeitlich begrenzte, gepulste Anregung mit geeignet einstellbarer Pulsbreite und

determiniertem breitbandigem "weißen" Rauschen dar. Beim breitbandigen "weißen" Rauschen bleibt der zeitliche Mittelwert der Amplitude über das Frequenzband gesehen konstant.

- 5 Im Ultraschallpuls 7 sind unter Berücksichtigung der nutzbaren Bandbreite der eingesetzten Transducer 5 alle Frequenzen mit etwa gleicher Amplitude enthalten. Die Phasenlagen sind jedoch so gewählt, dass die Amplituden beziehungsweise die Leistung in allen Frequenzbereichen über die Pulsbreite möglichst ausgeglichen verläuft. Durch die vorgegebene oder gewählte Bandbreite, die letztlich die Anstiegs- und Abfallszeit des
10 breitbandigen Pulses begrenzt, wird eine gepulste Leistungsverteilung mit rauschförmigem Signal bei zeitlich annähernd rechteckförmigem Verlauf erzeugt.

- Da die in das Verbindungsbauteil 1 einzukoppelnden Ultraschallpulse 7 mit festgelegter über die Frequenzbereiche variierender aber festgelegter Phase erzeugt werden, stehen die
15 Phaseninformationen (zusammen mit den Signalamplituden) in Abhängigkeit von den Frequenzen des Ultraschallfrequenzspektrums zur Verfügung, um bei der Auswertung der detektierten, digitalisierten Ultraschallpuls-Echos 8 genutzt werden zu können.

- Bei der Detektion der Ultraschallpuls-Echos 8 nach erfolgter gepulster Anregung mit
20 einem Ultraschallpuls 7, wie oben beschrieben, werden die Signale über einen Transientenrekorder TR zeitaufgelöst digitalisiert und einem angeschlossenen Rechner, wie zum Beispiel einem PC oder einem Laptop, zugänglich gemacht. Bei dem Transientenrekorder TR kann in vorteilhafter Weise ein digital arbeitender Transientenrekorder TR eingesetzt werden. Im zeitlich begrenzten und daher selektierbaren
25 Bereich der zu beobachtenden Ultraschallpuls-Echos 8 werden die in der Regel erheblich oder stark verrauschten Signale mit Hilfe von Fourier-Verfahren, wie zum Beispiel einer Fast-Fourier-Transformation, (FFT) unter Nutzung der bekannten Phasenlagen nach der Detektion und Digitalisierung komprimiert.

- 30 Bei der Detektion erfolgt die Transformation mittels eines Fourier-Verfahrens wie beispielsweise der FFT. Die Kompression erfolgt nach der Digitalisierung des empfangenen Signals über Rechner und Rechnerprogramme. Dabei wird das empfangene Signal zuerst fourier-transformiert. Dann werden die spektralen Komponenten in der Phase so verschoben, dass sich bei einer Darstellung über cosinus-Funktionen für eine mit Bezug
35 zum Anregungszeitpunkt festgelegten Zeitpunkt bei Abwesenheit der Vorspannkraft die Phasenlage 0 ergibt. Dadurch entsteht nach der Rücktransformation an diesem Zeitpunkt

ein komprimierter Puls mit markanter, maximaler Amplitude. Die Position des vom Betrag her maximalen Signals wird durch Anpassung einer Halbwelle in der Umgebung dieses Maximums bestimmt. Die Verschiebung der spektralen Komponenten und die Form der Anpassfunktion werden für das jeweilige Verbindungsbauteil 1 für alle Vorspannkraften gleich gewählt. Die Laufzeitdifferenzen, die zur Bestimmung der Vorspannkraft benutzt werden, ergeben sich durch Differenzbildung der Ergebnisse aus der Messung aus der Spannkraft. Der Zusammenhang zwischen Vorspannkraft und die beobachtete Laufzeitdifferenzen des jeweiligen Verbindungsbauteils 1 oder ein Los oder eine Charge davon wird empirisch mit Zugmaschinen, welche die genaue Aufprägung einer Spannkraft erlauben, festgestellt. Mit dem so festgestellten Zusammenhang wird die jeweilige Einzelmessung ausgewertet und die Spannkraft angezeigt.

Das erfindungsgemäß vorgeschlagene Verfahren nutzt alle noch über die Ultraschallstrecke, d.h. den Laufweg 6 des Ultraschallpulses 7, mit Hilfe der genutzten Transducer 5 transportierbaren und detektierbaren Frequenzanteile der Signale bei jeweils maximal möglicher Amplitude in allen genutzten Frequenzbereichen.

Im Unterschied von bereits bekannten Ultraschallmessverfahren zur Messung der Reflexion, bei denen zeitlich andauernde Signale eingesetzt werden, können wegen der genutzten, zeitlich begrenzten (gepulsten) Anregung gemäß des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens die Beiträge unterschiedlicher Ultraschallpuls-Echos 8 zum Beispiel transversal, longitudinal erstes, zweites, n-tes Echo vor der weiteren Verarbeitung, d.h. vor der Kompression, im Zeitbereich selektiert, d.h. aus den Messdaten herausgeschnitten werden. Bei den bekannten Ultraschallmessverfahren zur Messung der Reflexion, bei denen zeitlich andauernde Signale eingesetzt werden, handelt es sich um solche mit einer niedrigen Frequenz bei elektronischen Spektrometern, die die Phasenmessung beinhalten und demzufolge ausgesprochen messzeitsensitiv sind.

Bei kurzen Ultraschallsignallaufzeiten t , wie sie zum Beispiel bei als kurzen Schrauben beschaffenen Verbindungsbauteilen 1 auftreten und/oder bei besonders breitbandig arbeitenden Transducern 5, kann zudem in vorteilhafter Weise die zu nutzende Bandbreite auf mehrere, aufeinanderfolgende pulsförmige Anregungen verteilt werden. Die Verteilung der zu nutzenden Bandbreite auf mehrere, aufeinanderfolgende pulsförmige Anregungen kann statistisch linear oder auf eine andere Weise, beispielsweise über Wichtungen bestimmter Bandbreitenbereiche erfolgen. Es wird jeweils eine zum Ultraschallpuls 7, so zum Beispiel zu dessen Pulsmitte, festgelegte Phasenlage in den einzelnen, mittels eines

Fourier-Verfahrens, wie der FFT beziehungsweise nach einem anderen klassischen Auflösungsverfahren noch auflösbaren Frequenzintervall gewählt und diesem zugeordnet. Die jeweils dem Ultraschallpuls 7 zugeordnete Phasenlage ist damit auch während der weiteren Verarbeitung und insbesondere bei der Auswertung im Rahmen der Kompression der Signale bekannt.

Zum Beispiel kann in drei jeweils aufeinanderfolgenden und sich dann wiederholenden Anregungen jeweils das erste, das zweite und das dritte Drittel der gesamten Bandbreite, abhängig von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Transducer 5, genutzt werden. Bei der Auswertung der Signale, d.h. der Signalkompression, können die Beiträge der erwähnten drei Drittel summiert werden. Dadurch lässt sich aus den Daten ein komprimiertes Signal von optimaler kurzer Dauer und hoher Signalamplitude generieren. Prinzipiell ist auch eine statistische Verteilung über eine beliebige Anzahl von Ultraschallpulsen 7 oder jede andere Verteilung mit zu den Ultraschallpulsen 7 festgelegter Phase aller auflösbaren und/oder genutzten Frequenzintervalle möglich und kann erforderlichenfalls in vorteilhafter Weise ausgenutzt werden.

Statt wie bei dem linearen Chirp die Schwerpunkte der beteiligten Frequenzkomponenten zeitlich linear zu verteilen, können diese auch statistisch verteilt werden. Dies ist bei Signalen aus thermischer Anregung der Fall und kann durch entsprechend synthetisierte Signale auch determiniert erfolgen, auch mittels des Arbiträrgenerators AFG können solche deterministischen, rauschähnlichen Signale, auch als Pseudo-Random-Noise (prn) bezeichnet, generiert werden.

Ein Sonderfall am Pseudo-Random-Noise (prn) ist ein rauschförmiges Signal, bei dem die Amplituden der spektralen Komponenten möglichst konstant gehalten wird, jedoch die Phase bei der Synthetisierung determiniert statistisch fluktuiert. Ein solches Signal wird hier als elektrischer Puls 7 mit vorgegebener pseudo-statistischer Phasenlagen bezeichnet.

Bezugszeichenliste

	1	Verbindungsbauteil (Schraube, Bolzen)
	2	Schraubenkopf
5	3	Schraubenschaft
	4	Gewindeteil
	5	Transducer
	5.1	Elektrode
	5.2	Schutzschicht
10	5.3	piezoelektrischer Dünnsfilm
	6	Laufweg Ultraschallpuls
	7	Ultraschallpuls
	t	Zeit zwischen US-Puls-Einkopplung und US-Puls-Echo-Auskopplung
15	8	Ultraschallpuls-Echo
	Z	Zirkulator, Schalter, Reflektometer oder elektrische Verbindung
	AFG	(arbitrary function generator) Arbiträrgenerator
20	PC	Rechner
	V	Verstärker
	TR	Transientenrekorder
	TG	Taktgeber
	RG	Repetitionsratengenerator
25	TG	Taktgeber (clock)

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Spannkraft in Verbindungsbauteilen (1) durch
5 Ultraschalleinkopplung mittels eines programmierbaren Arbiträrgenerators (AFG)
mit nachfolgenden Verfahrensschritten:
 - a) Am programmierbaren Arbiträrgenerator (AFG) wird ein elektrischer Puls
10 (7) mit vorgegebener pseudo-statistischer Phasenlage der genutzten
und/oder vorgegebenen Frequenzkomponenten bei im wesentlichen
konstanter Amplitude mit vorgebbarer Pulsbreite generiert,
 - b) die gewählte Pulsbreite ist derart an Abstände von Ultraschallpuls-Echos (8)
angepasst, dass keine Überlappung einzelner unterschiedlicher Reflexe
auftritt,
 - 15 c) das empfangene Ultraschallpuls-Echo (8) wird bezüglich mindestens eines
Reflexes zeitlich selektiert und einem für das jeweilige Verbindungsbauteil
(1) festgelegten Transformationsverfahren unterworfen, derart, dass für
einen definierten, mit dem Ultraschallpuls (7) in Bezug stehenden Zeitpunkt
alle Frequenzbeiträge der Frequenzkomponenten zeitlich oder hinsichtlich
20 der Phase so verschoben werden, dass
 - d) sich für diesen Zeitpunkt bei Abwesenheit der Vorspannkraft immer die
Phasenlage 0 oder immer die Phasenlage π bei Darstellung der
Frequenzkomponenten über cosinus-Funktionen ergibt.
- 25 2. Verfahren zur Bestimmung der Spannkraft in Verbindungsbauteilen (1) durch
Ultraschalleinkopplung mittels eines programmierbaren Arbiträrgenerators (AFG)
mit nachfolgenden Verfahrensschritten:
 - a) am programmierbaren Arbiträrgenerator (AFG) wird ein elektrischer Puls
30 (7) in Form eines linearen Chirps der genutzten und/oder vorgegebenen
Frequenzkomponenten bei im wesentlichen konstanter Amplitude mit
vorgebbarer Pulsbreite generiert,
 - b) die gewählte Pulsbreite ist derart an Abstände von Ultraschallpuls-Echos (8)
angepasst, dass keine Überlappung einzelner unterschiedlicher Reflexe
35 auftritt,

- 5 c) das empfangene Ultraschallpuls-Echo (8) wird bezüglich mindestens eines Reflexes zeitlich selektiert und einem für das jeweilige Verbindungsbauteil (1) festgelegten Transformationsverfahren unterworfen, derart, dass für einen definierten, mit dem Ultraschallpuls (7) in Bezug stehenden Zeitpunkt alle Frequenzbeiträge der Frequenzkomponenten zeitlich oder hinsichtlich der Phase so verschoben werden, dass
- d) sich für diesen Zeitpunkt bei Abwesenheit der Vorspannkraft immer die Phasenlage 0 oder immer die Phasenlage π bei Darstellung der Frequenzkomponenten über cosinus-Funktionen ergibt.

10 3. Verfahren zur Bestimmung der Spannkraft in Verbindungsbauteilen (1) durch Ultraschalleinkopplung mittels eines programmierbaren Arbiträrgenerators (AFG) mit nachfolgenden Verfahrensschritten:

- 15 a) am programmierbaren Arbiträrgenerator (AFG) wird ein elektrischer Puls (7) als pseudo-random-noise der genutzten und/oder vorgegebenen Frequenzkomponenten bei im wesentlichen konstanter Amplitude mit vorgebbarer Pulsbreite generiert,
- 20 b) die gewählte Pulsbreite ist derart an Abstände von Ultraschallpuls-Echos (8) angepasst, dass keine Überlappung einzelner unterschiedlicher Reflexe auftritt,
- 25 c) das empfangene Ultraschallpuls-Echo (8) wird bezüglich mindestens eines Reflexes zeitlich selektiert und einem für das jeweilige Verbindungsbauteil (1) festgelegten Transformationsverfahren unterworfen, derart, dass für einen definierten, mit dem Ultraschallpuls (7) in Bezug stehenden Zeitpunkt alle Frequenzbeiträge der Frequenzkomponenten zeitlich oder hinsichtlich der Phase so verschoben werden, dass
- 30 d) sich für diesen Zeitpunkt bei Abwesenheit der Vorspannkraft immer die Phasenlage 0 oder immer die Phasenlage π bei Darstellung der Frequenzkomponenten über cosinus-Funktionen ergibt.

35 4. Verfahren gemäß Anspruch 2 dadurch gekennzeichnet, dass über die genutzte Pulsbreite die zeitliche Lage des Schwerpunktes der Frequenzbeiträge bezüglich der Frequenz eine stetige Funktion ist.

5. Verfahren gemäß der Ansprüche 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass gemäß Verfahrensschritt c) als definierter, mit dem Ultraschallpuls (7) in Bezug stehender Zeitpunkt die Pulsmitte oder der Pulsanfang oder das Pulsende gewählt werden.
- 5 6. Verfahren gemäß der Ansprüche 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass gemäß Verfahrensschritt a) Frequenzinhalte auf eine Vielzahl von aufeinander folgenden Ultraschallpulsen (7) verteilt werden.
7. Verfahren gemäß Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Frequenzinhalte auf
10 2 bis 100 Ultraschallpulse (7) verteilt werden.
8. Verfahren gemäß der Ansprüche 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass Messungen über einzelne Teilfrequenzbereiche im Frequenzspektrum des Ultraschallpulses (7) zusammengefasst werden, aus denen die Synthetisierung eines sich aus allen
15 Einzelbeiträgen ergebenden kurzen Signals erfolgt.
9. Verfahren gemäß der Ansprüche 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Ultraschallpuls (7) ein maximal anregbares Ultraschallfrequenzspektrum aufweist, mit welchem ein Spektrum von maximal anregbarer Bandbreite angeregt wird.
20
10. Verfahren gemäß der Ansprüche 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass zur Erzeugung des Ultraschallpulses (7) ein Arbiträrgenerator (AFG) oder DDS-Chips (Dynamic Digital Synthese) oder zeitgleich ein- und ausgeschaltete VCO's (Voltage Controlled Oszillator) eingesetzt werden und zur Detektion des Ultraschallpuls-
25 Echos (8) ein digitalisierender Transientenrekorder (TR.) eingesetzt wird.
11. Verfahren gemäß Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Arbiträrgenerator (AFG) und der Transientenrekorder (TR) vom gleichen Taktgeber (TG) gesteuert werden.
30
12. Verfahren gemäß Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass von dem Taktgeber (TG) eine Repetitionsrate für die jeweiligen Einzelmessungen abgeleitet wird.
13. Verfahren gemäß Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass in einer Anzahl von
35 aufeinanderfolgenden und sich wiederholenden Ultraschallpulsen (7) jeweils eine

dem Kehrwert der Anzahl entsprechende unterschiedliche, sich wechselseitig ausschließende und ergänzende Bandbreite genutzt wird.

- 5 14. Verfahren gemäß der Ansprüche 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass durch zeitlich ausgedehnte Anregung die Anregungsspannung minimal gehalten wird und so die Lebensdauer des Transducers (5) verlängert wird.
- 10 15. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens gemäß einem oder mehrerer der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass diese einen Prozessor oder einen Mikroprozessor enthält sowie einen programmierbaren Arbiträrgenerator (AFG) sowie einen digitalisierenden Transientenrekorder (TR) mit Verbindung zum Prozessor oder zum Mikroprozessor und einen Repetitionsratengenerator (RG) umfasst.
- 15 16. Vorrichtung gemäß Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Arbiträrgenerator (AFG) und der Transientenrekorder (TR) mit ein und demselben Taktgeber (TG) betrieben werden.
- 20 17. Vorrichtung gemäß Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Arbiträrgenerator (AFG), der Transientenrekorder (TR) und der Repetitionsratengenerator (RG) mit einem gemeinsamen Taktgeber (TG) betrieben werden.
- 25 18. Vorrichtung gemäß der Ansprüche 15, 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass dem Arbiträrgenerator (AFG) ein Leistungsverstärker nachgeordnet ist.
- 30 19. Vorrichtung gemäß der Ansprüche 15, 16 oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass dem Transientenrekorder (TR) ein Vorverstärker oder ein bezüglich der Verstärkung programmierbarer Vorverstärker mit Verbindung zum Rechner vorgeschaltet ist.
20. Vorrichtung gemäß der Ansprüche 15, 16, oder 17, dadurch gekennzeichnet, dass der Prozessor oder der Mikroprozessor in einem Personalcomputer (PC) oder einem Laptop enthalten ist.

1 / 1

Fig. 1

